



JUBILEO
Prof. Julio Ricaldoni

ANALISIS DE REGISTROS SISMICOS VERTICALES OBTENIDOS EN EL EDIFICIO AISLADO DE LA COMUNIDAD ANDALUCIA

María Ofelia Moroni, Ruben Boroschek, Carlos Rojas, Mauricio Sarrazin
Depto. Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Chile

SUMARIO

Desde 1992 está instalada una red local de acelerógrafos en dos edificios gemelos ubicados en Santiago, uno de los cuales está aislado sísmicamente. A la fecha se han registrado del orden de 40 sismos moderados. Se observa en ambos edificios una amplificación de las aceleraciones verticales máximas, siendo ésta mayor en el edificio aislado. El sistema de aislación es el factor que más contribuye a dicha amplificación.

Mediante el uso de técnicas no paramétricas se determinan las propiedades dinámicas verticales a partir de registros de microvibraciones y de los sismos ocurridos a la fecha. La frecuencia natural vertical del edificio aislado, obtenida del análisis de microvibraciones, es del orden de 15 Hz. La frecuencia predominante, obtenida del análisis de los registros sísmicos varía entre 14.7 y 16.2 Hz. Esta banda indica cierta no linealidad en el comportamiento de los aisladores.

A partir de los resultados obtenidos del proceso de identificación de propiedades dinámicas, se desarrollan dos modelos teóricos del edificio aislado que reproducen las respuestas reales registradas. Ambos modelos presentan un buen ajuste con los registros de aceleraciones verticales.

Los modelos planteados son lineales equivalentes. A pesar de sus limitaciones permiten reproducir parcialmente el comportamiento observado. Un modelo no lineal permitiría un mejor ajuste de la respuesta así como su estimación ante movimientos severos. Los resultados de este estudio indican que puede ser importante en el diseño de estructuras aisladas considerar la deformabilidad vertical de los aisladores.

INTRODUCCION

Los sismos generan vibraciones en todas direcciones; sin embargo en el diseño de la mayoría de las estructuras, incluidas las aisladas sísmicamente, son los movimientos horizontales los que acaparan la atención de los diseñadores. Algunos códigos de diseño especifican los tipos de estructuras donde los movimientos verticales sí pueden ser importantes y en esos casos, recomiendan aplicar fuerzas o espectro de diseño en esa dirección, calculadas como una fracción (p. ej. 2/3) de las fuerzas o espectro especificado en la dirección horizontal.

A partir de registros obtenidos en campo libre para diferentes sismos, Bozorgnia et al (1995) han analizado la razón existente entre espectros de aceleración vertical y horizontal, concluyendo que esta razón depende del período y de la distancia epicentral. Para períodos cortos y epicentros cercanos ésta puede ser mayor que 1, mientras que para períodos largos y epicentros lejanos ésta disminuye a menos de 2/3.

Colocar aisladores sísmicos en la base de los edificios ha demostrado ser eficiente en reducir las aceleraciones horizontales al interior de éstos, en proporcionar capacidad de disipación de energía y en disminuir los movimientos relativos horizontales que pueden ocurrir a nivel de cada piso. Sin embargo, a medida que se ha dispuesto de registros en estructuras aisladas se ha podido comprobar que en la dirección vertical ocurren amplificaciones entre lo medido en el campo libre y en las estructuras sobre el nivel de los aisladores.

Bozorgnia et al (1995) analizan a través de técnicas espectrales, cálculo de funciones de transferencia, de coherencia y ángulo de fases, las componentes verticales obtenidas en tres edificios aislados durante el sismo de Northridge en 1994: uno de 7 pisos del hospital de la Universidad de California en Los Angeles, un Cuartel de Bomberos en Los Angeles de dos pisos y un edificio de oficinas de 8 pisos en Seal Beach. En el primer edificio determinan la amplificación entre la máxima aceleración vertical medida sobre el nivel de aislación y la medida bajo el nivel de aislación, la que varía entre 1.14 y 1.44 y la frecuencia vertical del sistema aislado que está entre 10.5 y 12.8 Hz. Para el segundo edificio determinan la frecuencia vertical del sistema aislado entre 7.2 y 8.9 Hz, lo cual se compara bien con los valores determinados analíticamente de 8.9 y 9.1 Hz. En el tercer edificio los aisladores están colocados sobre el primer piso y se registra una amplificación vertical de 2.2 veces en el techo del edificio respecto del segundo piso; en cuanto a las frecuencias predominantes en la dirección vertical varían entre menos de 2.5 Hz (producto de rocking del edificio en la dirección NS) y 10-13 Hz en una columna exterior.

En el edificio aislado y su gemelo convencional de la Comunidad Andalucía en Santiago (Moroni et al, 1998), se ha instalado una red de acelerógrafos desde 1992, registrándose a la fecha más de 40 sismos moderados, con lo cual se ha podido demostrar la efectividad del sistema de aislación en la dirección horizontal; sin embargo en la dirección vertical se ha observado cierta amplificación. En este trabajo se obtienen características dinámicas del edificio aislado, a partir del análisis e interpretación de registros de vibraciones ambientales y de los sismos obtenidos y se proponen modelos analíticos que puedan reproducir su comportamiento real.

RESPUESTA DEL EDIFICIO ANTE MICROVIBRACIONES

En el área de la dinámica experimental existen diversas técnicas no destructivas con distintos grados de complejidad, que permiten, entre otras, la medición e identificación de propiedades dinámicas estructurales reales, ajuste y verificación de modelos computacionales y determinación de parámetros controladores del comportamiento. Estas técnicas se pueden dividir en dos grandes áreas: Identificación no Paramétrica e Identificación Paramétrica.

En el primer caso se puede determinar una función asociada a un proceso sin necesidad de información previa sobre él, i.e. se identifican variables típicas de un registro de aceleración las cuales se asocian luego a parámetros de la estructura. En el segundo caso, conocida la excitación se puede ajustar un modelo de la estructura mediante técnicas de optimización. Ambas metodologías se han aplicado para determinar las características dinámicas del edificio materia de este estudio.

En primer lugar, se realizaron mediciones de microvibraciones en dos oportunidades obteniéndose registros en el primer y cuarto piso del edificio aislado, cuarto piso del edificio convencional y en el exterior de ambos edificios. Para cada registro se calculó los espectros de densidad de potencia y función de transferencia, de los cuales se pudo identificar las frecuencias predominantes en ellos. En la Fig 1 se muestra una de estas funciones para registros obtenidos en el primer y cuarto del edificio aislado. En el edificio aislado se observa una frecuencia principal en vertical en torno a los 15 Hz, mientras que en el suelo, una frecuencia en los 20 Hz aparece con la mayor amplitud (posiblemente producto de vibraciones en industrias cercanas).

RESPUESTA DEL EDIFICIO ANTE SISMOS LEVES

Se ha preparado una base de datos con los registros obtenidos que incluye fecha y magnitud del evento, profundidad, y aceleraciones máximas e Intensidades de Arias, tanto de los registros en dirección horizontal como en vertical. En la Fig 2 se muestra las razones entre las aceleraciones verticales máximas del 4° piso aislado respecto del suelo, del 4° piso aislado respecto del 4° piso convencional y del 1° piso aislado respecto del suelo en función de la aceleración máxima vertical del suelo. La amplificación entre el suelo y la losa del primer piso es cercana a dos, mientras que entre ese piso y el cuarto es del orden de 1.5; algo similar a lo que ocurre entre el suelo y el 4° piso convencional. En la Fig. 3 se grafica las razones de las Intensidades de Arias entre el 4° piso aislado y 4° piso convencional respecto del suelo en función de la Intensidad de Arias del registro del suelo. En ambos edificios ocurren amplificaciones, apreciándose una leve tendencia a disminuir en el caso del edificio aislado a medida que aumenta la Intensidad de Arias del registro del suelo.

A través de espectros de Fourier y funciones de transferencias de cuatro de los sismos mas importantes registrados se ha determinado las frecuencias verticales predominantes las cuales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Frecuencias predominantes durante diferentes sismos

Fecha	Frecuencia Hz
10-oct-94	14.7 - 16.2
22-feb-96	15.0 - 15.5
24-mar-97	15.0 - 15.5
19-jun-97	15.5 - 16.2

El análisis realizado a las señales transversales registradas en el edificio aislado durante el sismo del 22 de febrero de 1996, muestra que en el primer y cuarto piso las respuestas de aceleración presentan una frecuencia predominante de 2 Hz, que corresponde al primer modo de la estructura. Sin embargo en ambas señales aparece además una importante participación de frecuencias de 11 y 15 Hz, tal como se observa en la Fig. 4 (Riveros, 1998).

Para comprender mejor la participación de las frecuencias de 11 y 15 Hz en los registros transversales, se determinaron los espectrogramas de dichas señales, obteniéndose así el contenido de frecuencias a través del tiempo. En la Fig. 5 se muestra uno de estos espectrogramas en el cual se

observa que durante la etapa previa a la zona de movimiento fuerte (aprox. a los 25-30 seg) predominan las frecuencias de 6.5 y 15 Hz, que corresponden, respectivamente, a la frecuencia transversal del edificio y a la participación en la componente horizontal del modo vertical del edificio; una vez que se alcanza la zona de mayor energía del sismo, predomina el modo transversal de 2 Hz y aparece una frecuencia en torno a los 11 Hz, desapareciendo la de 15 Hz.

Esto puede tener dos explicaciones: las frecuencias de 11 y 15 Hz corresponden a un mismo modo, que refleja el comportamiento no lineal de los aisladores o corresponden a modos separados, en que el primero sólo se excita durante la fase de movimiento fuerte del sismo aumentando su participación en la señal.

MODELOS ANALITICOS DEL EDIFICIO AISLADO

En el análisis sísmico de edificios, normalmente se usan modelos de marcos equivalentes y masas concentradas a nivel de piso sometidos a acciones horizontales. Para poder representar el comportamiento vibratorio vertical debe incluirse grados de libertad adicionales y una distribución de masas y rigidez apropiada. En ocasiones se pueden realizar análisis de sensibilidad con el fin de determinar una precisión adecuada del modelo en estudio, (Kehoe et al, 2000).

En este caso, en primer lugar se realizó un análisis paramétrico basado en la metodología de identificación modal propuesta por Beck, 1978. Inicialmente se desarrolla un modelo de un grado de libertad, al cual se le aplica una señal (excitación basal monitoreada) y se obtiene una señal de respuesta. Esta se ajusta posteriormente modificando los parámetros modales del modelo, minimizando el error respecto de la respuesta real observada.

En la Fig. 6 se comparan los resultados del proceso de identificación paramétrica representados a través de las aceleraciones relativas del modelo con las registradas en el 4° piso del edificio aislado para el sismo del 22 de febrero de 1996, para una frecuencia similar a la determinada con el análisis no paramétrico y un amortiguamiento del 4 %. Las respuestas en desplazamientos relativos no se ajustan muy bien, debido al bajo nivel de amplitud.

Se han desarrollado dos modelos de elementos finitos lineales equivalentes, definidos por la misma geometría y número de elementos, diferenciándose por los grados de libertad considerados, sólo verticales (modelo 1) o verticales y transversales (modelo 2). Los análisis computacionales se realizaron con el programa SAP90; para determinar frecuencias y formas modales se usó los vectores de Ritz. La rigidez vertical de los aisladores, el módulo de elasticidad de la albañilería y del hormigón y la razón de amortiguamiento de la estructura se modificaron hasta lograr un mejor ajuste entre la respuesta de los modelos y la respuesta real. Esto significó en el modelo 1, usar una rigidez vertical de los aisladores de 302800 Kg/cm (valor promedio obtenido experimentalmente por Araya, 1994), módulo de elasticidad de la albañilería de 15000 kg/cm², y un amortiguamiento de 4%. En la tabla 2 se comparan las respuestas máximas de aceleración del modelo con las reales para diferentes sismos en el primer y cuarto piso, cuando el modelo se somete a la acción de aceleraciones verticales en la base.

Tabla 2. Comparación de Respuestas de Aceleraciones Máximas (cm/seg²)

Sismo	Respuesta modelo 1		Respuesta real	
	primer piso	cuarto piso	primer piso	cuarto piso
22-feb-96	68.67	83.91	67.55	89.84
24-mar-97		80.59		92.8
10-oct-94	9.23	12.64	7.88	12.74
19-jun-97		30.55		29.0

En la Fig. 7 se compara la respuesta de aceleración vertical absoluta real con lo obtenido con el modelo 1 para el sismo del 24 de marzo de 1997.

En el segundo modelo se usaron los parámetros siguientes: rigidez horizontal del aislador 3300 kg/cm, rigidez vertical del aislador 302800 kg/cm, módulo de elasticidad del hormigón 280402 kg/cm², módulo de elasticidad de la albañilería 16500 kg/cm² y amortiguamientos modales de 8% para el primer modo y 5% para el resto. Este modelo se sometió a la acción simultánea de aceleraciones verticales y transversales en la base.

En la Fig 8 se compara la respuesta de aceleración vertical absoluta real con lo obtenido con el modelo 2 para el sismo del 24 de marzo de 1997. Sin embargo, las respuestas transversales del modelo, ante una acción en su base en la misma dirección, dan valores menores que las registradas; por otra parte este modelo tampoco logra reproducir la frecuencia de 11 Hz y la participación en torno a los 15 Hz es menor que la que aparece en la señal real. Esto muestra que la modelación del edificio desarrollada para reproducir el comportamiento transversal presenta limitaciones.

CONCLUSIONES

Mediante un análisis no paramétrico en el espacio de las frecuencias se ha obtenido que en el edificio aislado se presenta una participación importante de frecuencias predominantes en la dirección vertical en torno a los 15 Hz. Para el edificio convencional, en cambio la identificación de sus propiedades no es clara, ya que el nivel de ruido de las señales no permite apreciar formas de vibrar predominante de la estructura.

Ante sismos leves, tanto en el edificio aislado como en el convencional, las aceleraciones verticales transmitidas desde el suelo hacia la estructura aumentan, siendo este aumento mayor en el edificio aislado. Las mayores amplificaciones se producen entre el suelo y el nivel de primer piso, indicando que el efecto de amplificación es causado fundamentalmente por el sistema de aislación.

Al considerar las Intensidades de Arias de los registros, se observa un aumento en la energía transmitida por el sismo a ambas estructuras con respecto al suelo, siendo éste mayor en el edificio aislado. Al aumentar la intensidad de los sismos, se observa una leve tendencia a disminuir las amplificaciones tanto de las Intensidades de Arias como de las aceleraciones máximas.

Se han analizado cuatro registros sísmicos mediante técnicas no paramétricas. En el edificio aislado, las frecuencias predominantes de las señales a nivel de losa del primer piso y del cuarto piso coinciden en rangos comprendidos entre los 14.7 a 16.2 Hz, valor cercano a los 15 Hz obtenidos en microvibraciones. La existencia de una banda más ancha de frecuencias y el análisis de las señales horizontales indicaría cierta no linealidad en el comportamiento vertical de los aisladores.

Mediante técnicas de identificación modal, representando al edificio como un sistema de un grado de libertad, se obtuvo valores de las frecuencias que confirman los encontrados a través del análisis no paramétrico. Las respuestas de aceleración que entrega dicho modelo ante una acción sísmica tienen un ajuste de buena calidad con respecto a la respuesta real, medida en el cuarto piso; sin embargo la respuesta en desplazamientos relativos no se ajusta bien.

Se desarrollaron dos modelos analíticos lineales equivalentes del edificio aislado. En el primero de ellos sólo se incluye un grado de libertad vertical en cada nudo, mientras que en el segundo se incluye además grados de libertad transversales. En ambos modelos las propiedades de sus elementos se ajustaron de manera de igualar las respuestas de ellos con las respuestas reales de la estructura ante diferentes eventos sísmicos. Ambos modelos presentan una buena correlación con las respuestas reales en términos de aceleración vertical ; sin embargo, el modelo que incluye desplazamientos transversales no es capaz de representar adecuadamente los movimientos reales que ocurren en esa dirección. Entre las causas que pueden explicar esta limitación están las características no lineales del sistema de aislación y una distribución diferente de masas y rigideces en la superestructura. Se debe esperar que la estructura sea sometida a sismos de mayor intensidad para validar completamente los modelos propuestos.

REFERENCIAS

Araya, M. (1994) "Desarrollo y fabricación de aisladores sísmicos para edificio habitacional", Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.

Beck, J., (1978), "Determining models of structures from earthquakes records", EERL 78-01, Caltech, CA.

Bozorgnia, Y., Mahin S., Brady G., (1995), "Vertical responses of twelve instrumented structures recorded during the Northridge earthquake", The 1995 NEHRP Professional Fellowship Report, PF95-4.

Kehoe B., Attalla M., (2000) "Considerations of vertical acceleration on structural response", Proc. 12WCEE, Paper N°1065.

Moroni M.O., Sarrazin M., Boroscsek R., (1998) "Experiments on a base-isolated building in Santiago, Chile", Engineering Structures, Vol 20, N° 8 pp 720-725.

Riveros, P., (1998), "Análisis de los registros sísmicos horizontales obtenidos en un edificio aislado en su base", Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.

Wilson, E.L., Habibullah, A. (1992), "SAP90, A series of computer programs for the finite element analysis of structures", Computer and Structures, Inc, Berkeley, CA.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Universidad de Chile y el proyecto Fondecyt N° 1970732.

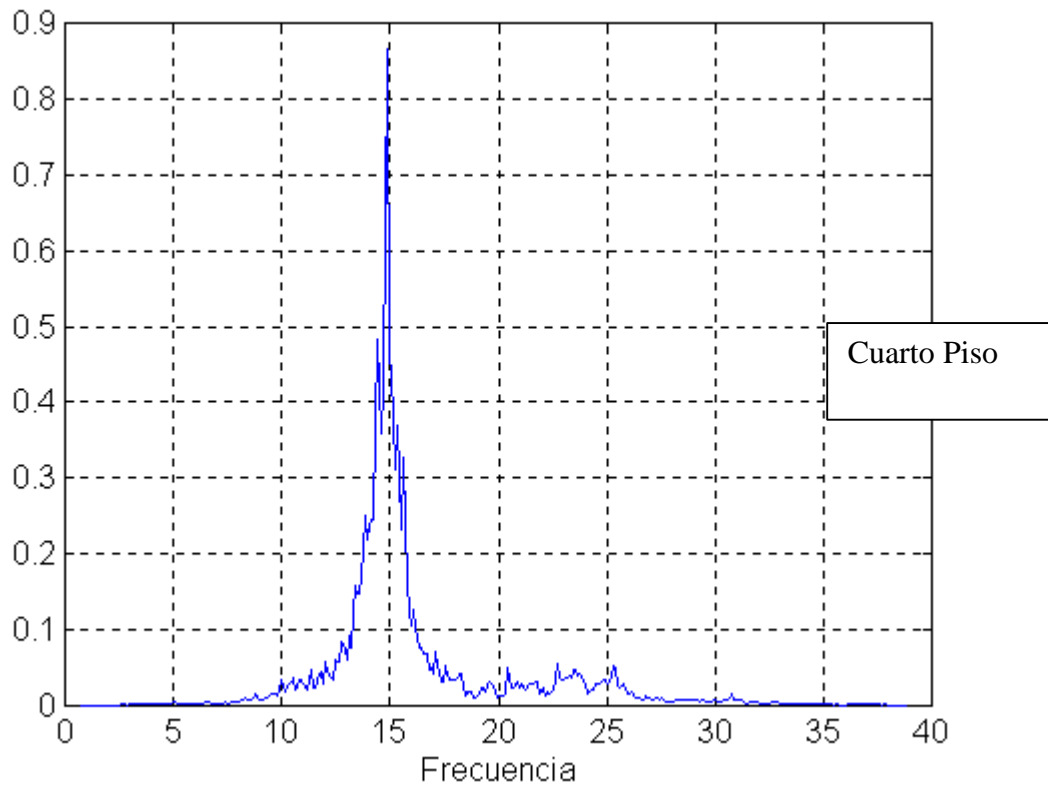
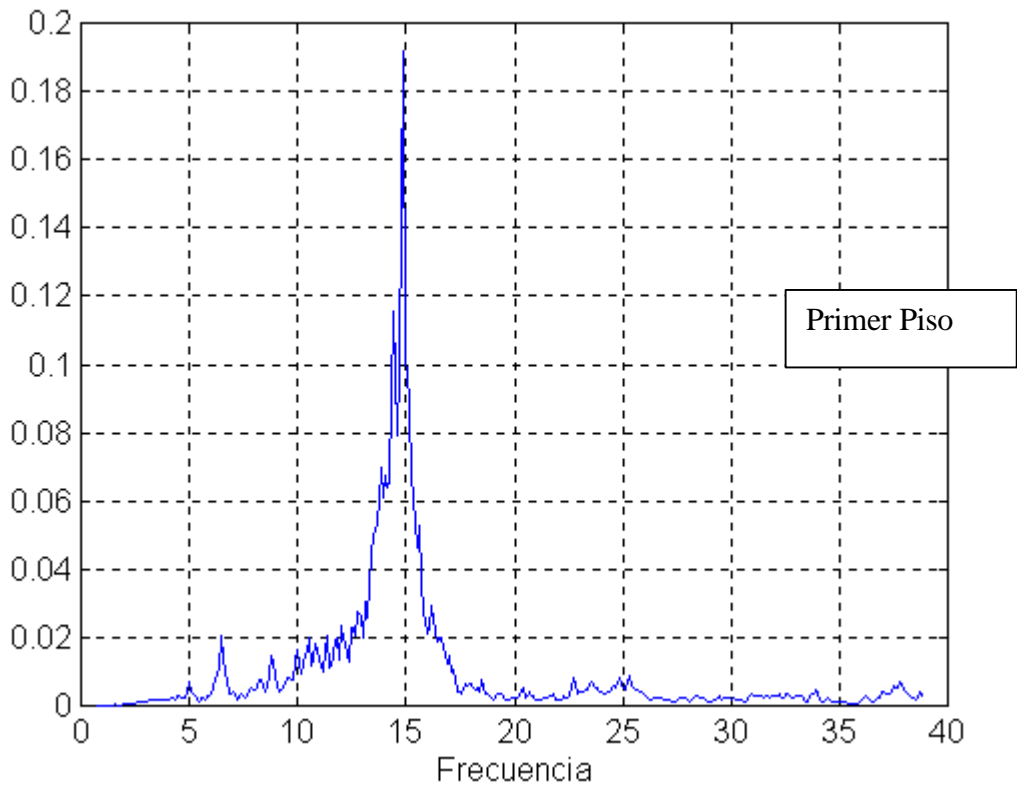


Figura 1. Espectro densidad de potencia microvibraciones primer y cuarto piso edificio aislado

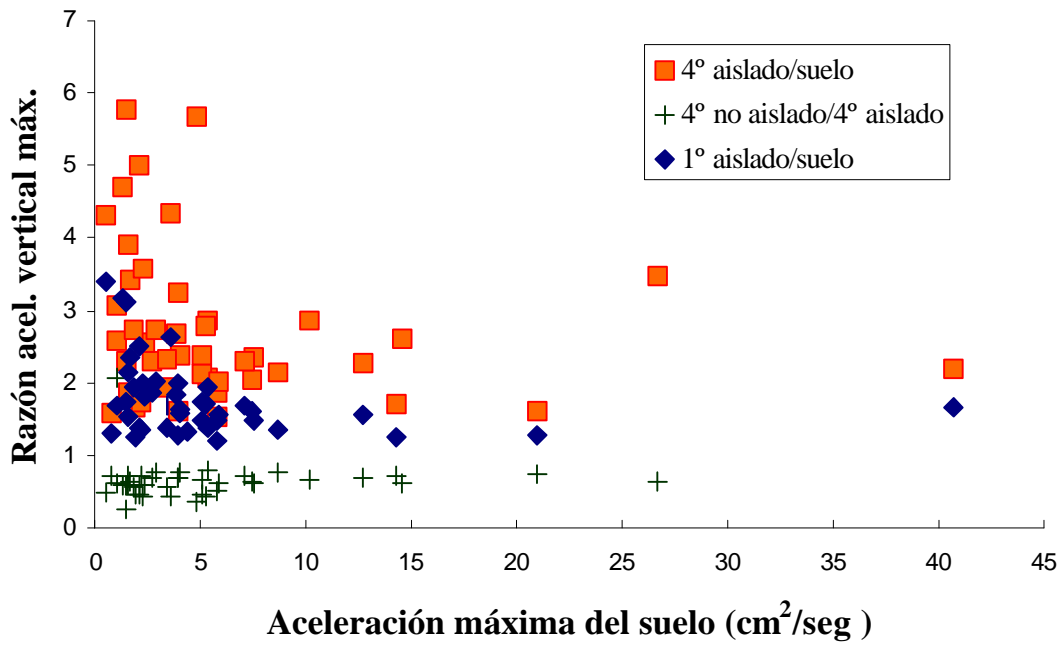


Figura 2. Relación aceleración máxima vertical

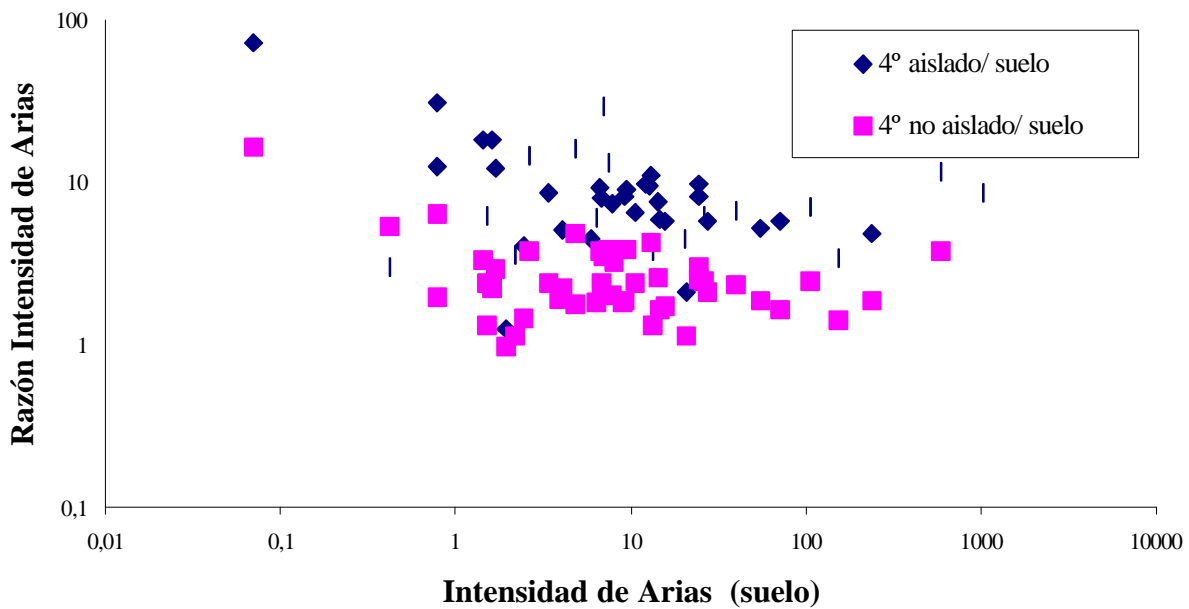


Figura 3. Relación Intensidad de Arias.

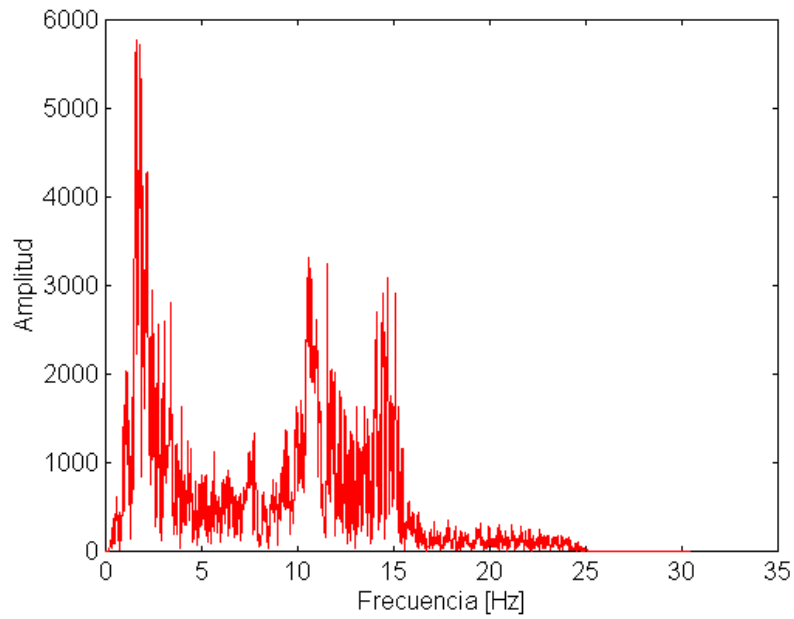


Figura 4. Espectro de Frecuencias respuesta transversal cuarto piso aislado (sismo 22/2/96)

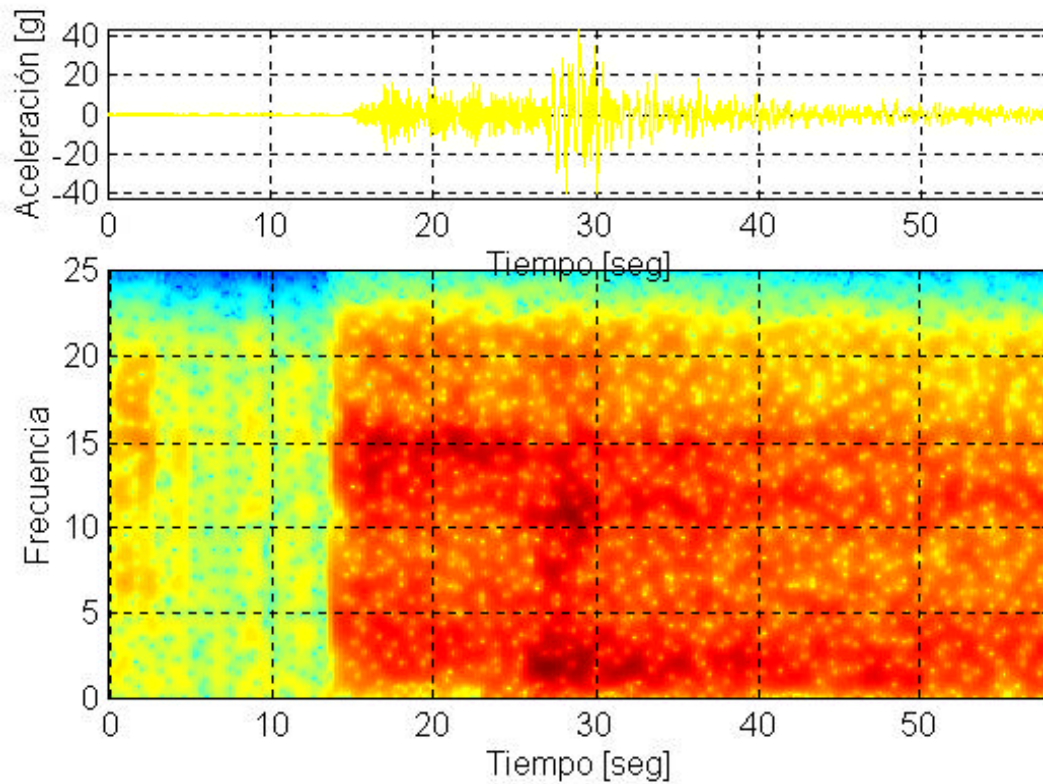


Figura 5 Espectrograma registro transversal sismo 22/2/96

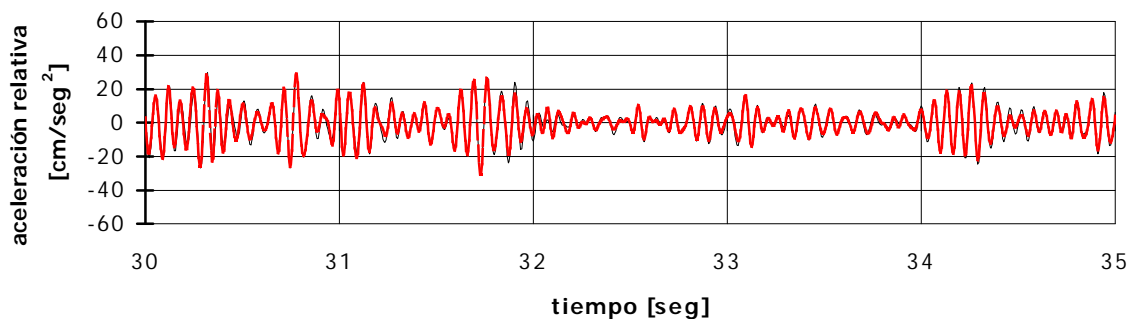
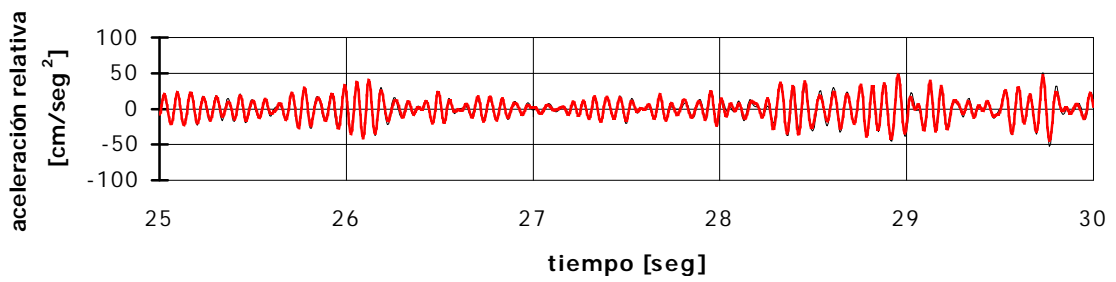
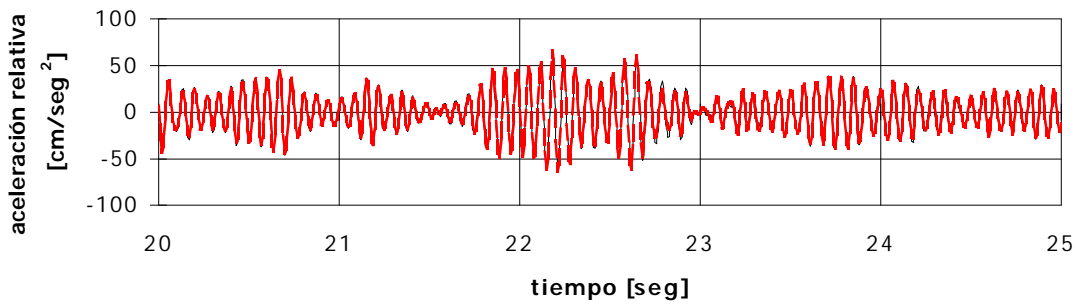
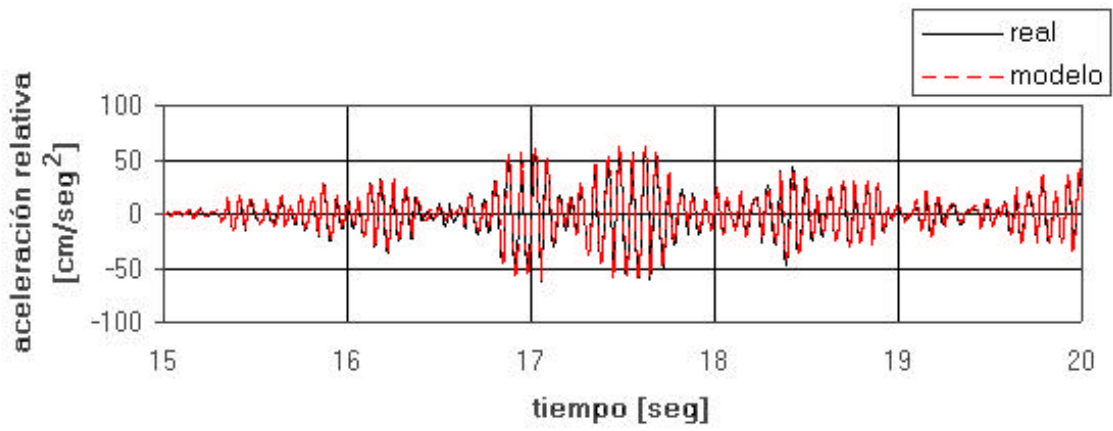


Figura 6 Respuesta aceleración vertical real vs modelo Beck (sismo 22/2/96)

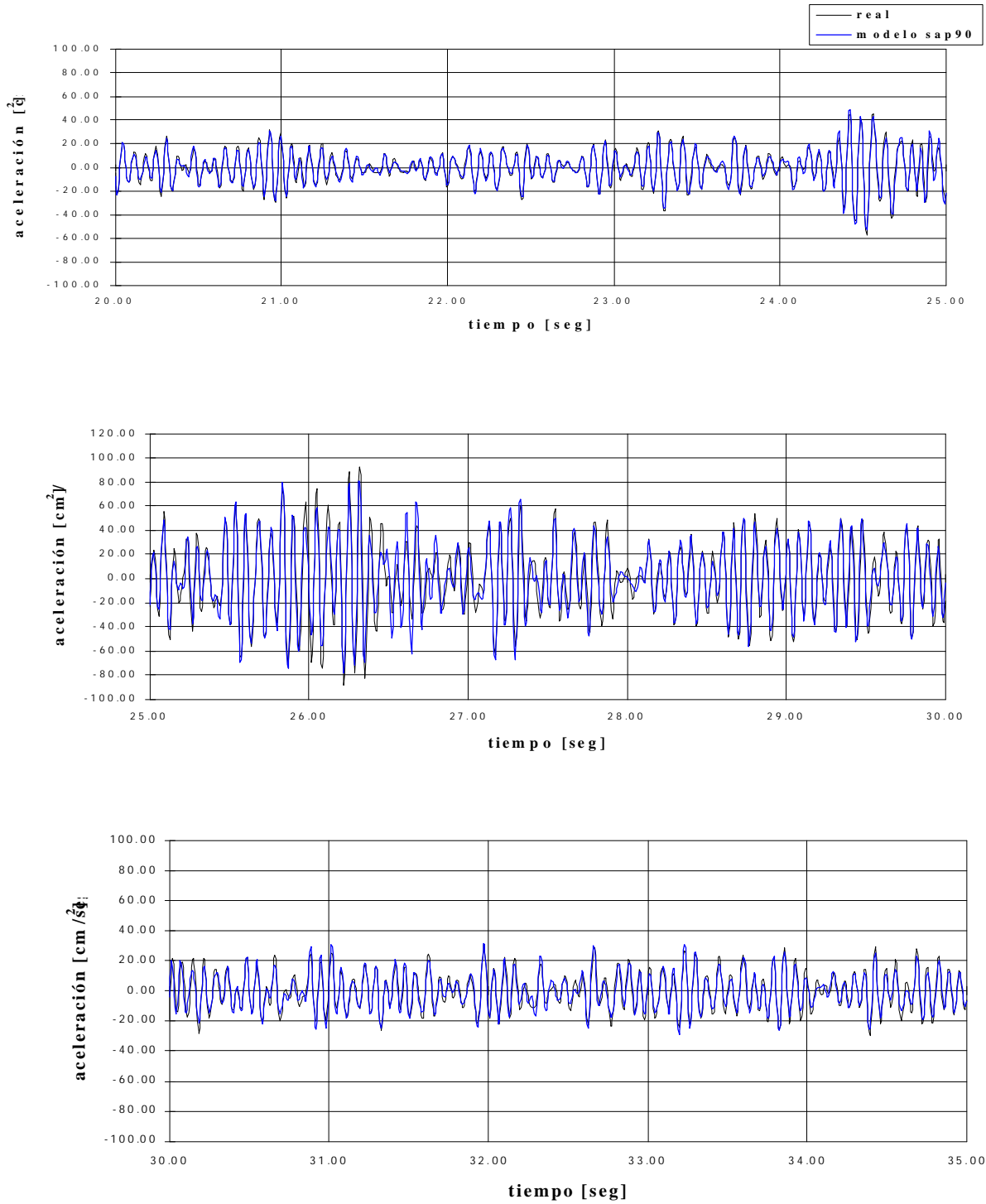


Figura 7 Respuesta aceleración vertical absoluta real cuarto piso modelo 1 sismo 24/2/97

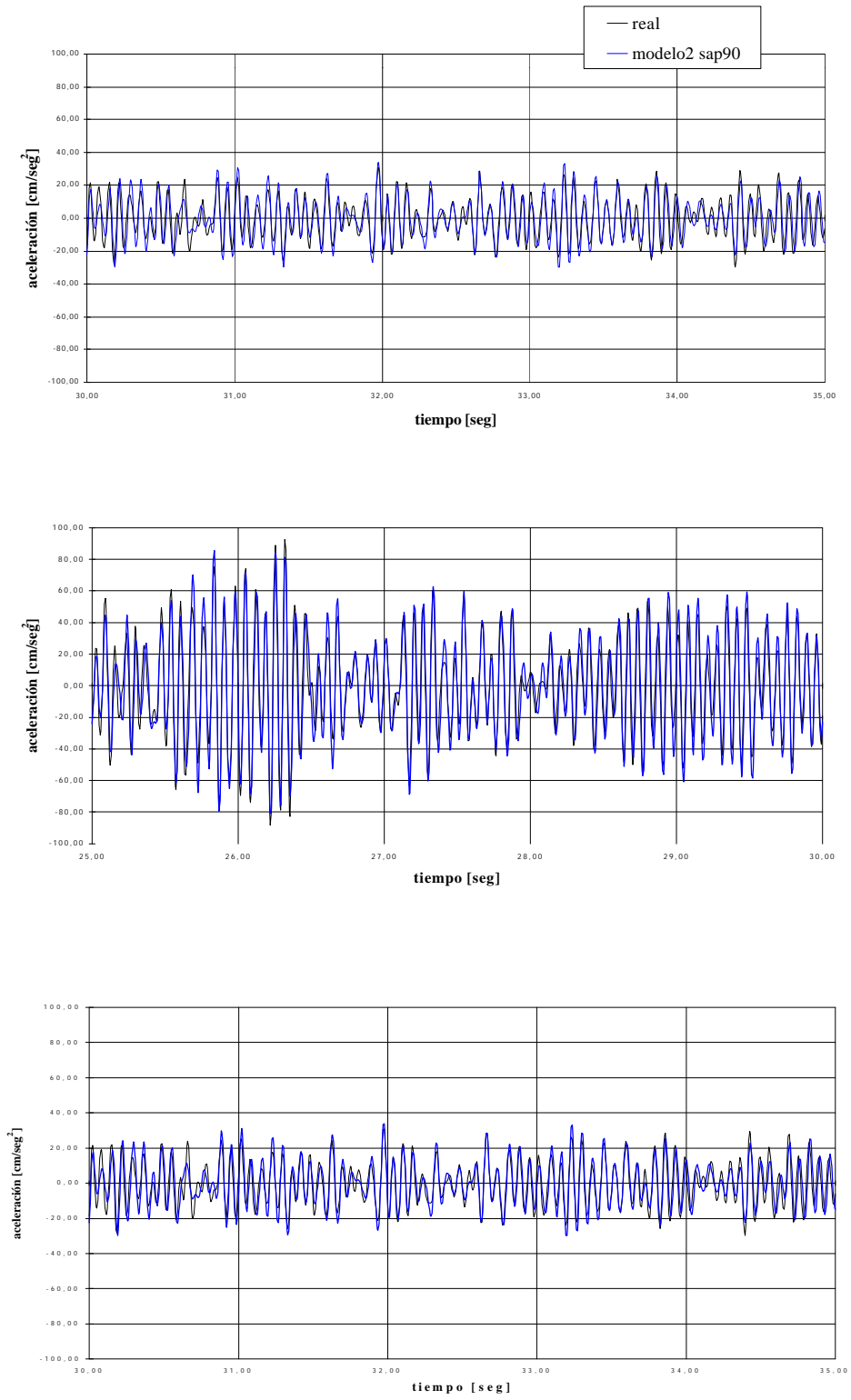


Figura 8 Comparación respuesta aceleración vertical absoluta (sismo 24/2/97)